

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Авосопянца Гранта Владимировича «Квантово-оптические эффекты и устройства с использованием тепловых состояний света», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Диссертационная работа Г. В. Авосопянца посвящена исследованию физических эффектов, связанных с распространением квазитепловых состояний электромагнитного поля через линейно-оптические интегральные схемы и отщеплением фотонов от указанных состояний. Исследования по отщеплению и добавлению фотонов в заданные моды излучения, а также приготовлению квазитепловых состояний света, активно развиваются в последние два десятилетия. Это обусловлено как фундаментальным интересом к экспериментальной проверке канонических коммутационных соотношений для операторов рождения и уничтожения фотонов, так и возможностью приготовления негауссовских квантовых состояний, которые находят применение в квантово-информационных приложениях. **Актуальность** диссертационного исследования заключается в изучении возможных применений квазитепловых состояний излучения как для характеристики линейно-оптических интегральных схем, являющихся одним из прототипов для реализации квантовых вычислений, так и для приготовления негауссовских квантовых состояний с помощью процедуры отщепления фотонов. Некоторые негауссовские состояния низкой энергии, например, обладают большей стойкостью к потере квантовой перепутанности вследствие шумов ослабления и усиления по сравнению с гауссовскими состояниями произвольной интенсивности. Поэтому всесторонний анализ (теоретический и экспериментальный) способов описания, приготовления, измерения и применения негауссовских состояний, возникающих при отщеплении фотонов от квазитепловых состояний света, является очень востребованным в квантово-информационном сообществе.

Диссертация Г. В. Авосопянца состоит из введения, четырёх глав и заключения.

Во введении соискатель дает обзор современного состояния исследований, в частности, описывает экспериментальные достижения в задаче рассеяния фотонов в линейно-оптической интегральной схеме, решение которой требует экспоненциально сложного нахождения перманента матрицы большой размерности. Соискатель обозначает объект и предмет исследования, формулирует цель и задачи, описывает научную новизну и практическую значимость работы. Во введении также представлены 5 основных положений, выносимых на защиту, приведён список научных мероприятий, на которых диссертационная работа прошла апробацию.

В первой главе представлен обзор литературы, в котором освещаются свойства операторов рождения и уничтожения фотона, методы измерения и восстановления оптических квантовых состояний, методы приготовления квазитепловых состояний света

с отщеплением фотонов, принципы линейно-оптических квантовых вычислений и методы характеристики линейно-оптических интегральных схем.

Во второй главе представлена процедура приготовления квазитепловых состояний света, связанная с прохождением лазерного излучения через вращающийся матовый диск. Кратко описана физическая процедура отщепления заданного числа фотонов, подробно описан формализм производящих функций для расчета распределения по числу фотонов у состояния, получаемого отщеплением k фотонов от квазитеплого состояния. Введены и количественно проанализированы различные параметры негауссовости у полученного состояния электромагнитного поля, а также динамика этих параметров вследствие наличия линейных потерь. Экспериментально исследован эффект отсутствия отбрасывания тени при частичном отщеплении фотонов из одной моды излучения и условном сканировании профиля интенсивности излучения.

В третьей главе соискателем представлено теоретическое описание статистики фотонов подсистемы многомодовых тепловых состояний с отщеплением фотонов, полученное в формализме производящих функций. Соискателем подробно проанализирована связь между различными распределениями, в частности, показано, что распределение Бозе-Эйнштейна является предельным случаем более общего распределения Пойа. Также в этой главе представлены результаты экспериментов по статистическому восстановлению параметров состояния на основе статистики фотоотсчётов и квадратурных измерений.

В четвертой главе представлена теория и эксперимент по характеристике параметров линейно-оптических интегральных схем посредством корреляционных измерений тепловых полей с учетом потерь в схеме, а также проведено сравнение результатов с параметрами, восстановленными с использованием когерентных состояний света.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

К наиболее **важным и значимым результатам**, определяющими научную новизну и оригинальность диссертационной работы Г. В. Авосопянца, на мой взгляд, можно отнести следующие:

1. Разработка математической модели компаунд-распределения Пуассона и формализма производящих функций, которые лаконично описывают семейство квазитепловых состояний с различным количеством отщепленных фотонов; а также экспериментальная реализация негауссовских квазитепловых состояний с отщеплением до 10 фотонов включительно.
2. Экспериментальное измерение статистики фотонов подсистемы многомодового теплового состояния с отщеплением заданного количества фотонов, которое хорошо описывается предложенной соискателем моделью на основе свертки компаунд-распределения Пуассона и распределения Пойа.

3. Разработка метода восстановления передаточной матрицы линейно-оптического многоканального интерферометра посредством корреляционных измерений тепловых полей и практическая реализация данного метода.

Практическая значимость экспериментальных, теоретических и численных результатов, полученных в ходе исследования, обусловлена применением линейно-оптических интегральных схем для реализации квантовых вычислений и применением негауссовских квантовых состояний для некоторых протоколов передачи квантовой информации. Предложенные теоретические и экспериментальные методы востребованы и при решении других квантово-оптических задач, например, в задаче рассеяния фотонов в линейно-оптической интегральной схеме, расчете квантовой энтропии, оценке пропускных способностей квантовых линий связи.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Соискатель выводит формулу (1.18) и вытекающую из неё формулу (1.25) для квантовой операции отщепления фотонов в первом порядке малости по параметру r (амплитудный коэффициент отражения). Условие малости r выполняется в эксперименте ($r^2 \approx 3 - 10\%$), однако необходимо учитывать, что все формулы верны лишь в этом первом порядке по r . В частности, конечность параметра r может влиять и на расхождение между теорией и экспериментом, которое обсуждается в конце раздела 2.2 на стр. 69–70, однако соискатель объясняет расхождение лишь темновыми шумами и нестабильностью мощности и поляризации лазерного излучения.

2. В диссертации неоднократно утверждается, что операторы рождения и уничтожения фотонов можно реализовать «напрямую (но вероятностным способом)» (стр. 5, 14), из чего можно сделать вывод, что единственным препятствием к реализации идеального отображения (1.25) являются лишь неидеальности эксперимента. На самом деле есть и чисто теоретическое препятствие к реализации отображения отщепления фотона (1.25), связанное с тем, что указанное **отображение не является неувеличивающим след** ни при каких ненулевых значениях коэффициента C , и поэтому оно не является квантовой операцией в строгом смысле [S. N. Filippov. On quantum operations of photon subtraction and photon addition. Lobachevskii Journal of Mathematics 40, 1470–1478 (2019)]. Кроме того, если бы в эксперименте рассматривались высокоэнергетические квазитепловые состояния, то ошибка такого упрощенного рассмотрения была бы уже существенной.

3. В описании дисперсии квадратурной компоненты вакуумного состояния на стр. 20–21 соискатель учитывает ядро (1.40), однако не учитывает перерастяжку квадратурной компоненты, которая верно описана словесно в конце стр. 67. Это приводит к ошибке на стр. 21 в формуле (1.41) для измеренного среднеквадратичного отклонения. Ошибку можно увидеть и при стремлении квантовой эффективности к нулю, формула (1.41) в этом случае приводит к расходящемуся значению, хотя должна давать дисперсию вакуумного состояния (на этом основана калибровка в экспериментах многих научных групп).

4. В описании передаточной матрицы линейно-оптической интегральной схемы на стр. 34 в формуле (1.56) указывается связь между операторами уничтожения фотонов. На стр. 103 учитывается влияние потерь, в результате чего коэффициенты затухания входят в передаточную матрицу по формуле (4.9). Однако такая модификация нарушает канонические коммутационные соотношения для операторов рождения и уничтожения фотонов, если пользоваться формулой (1.56). Замечание сводится к тому, что формулу (4.9) можно использовать для амплитуд классических полей, однако её нельзя использовать для операторов уничтожения. Решение проблемы заключается во включении в рассмотрение вспомогательных мод окружения, такой подход хорошо известен в теории гауссовских бозонных квантовых каналов.

5. В разделе 4.4 мне не удалось найти восстановленных параметров затухания, используемых в формуле (4.9).

6. В формуле (1.63) для описания эффекта Керра пропущена мнимая единица в показателе экспоненты.

7. В формуле (2.7) для собственных функций гармонического осциллятора указан аргумент x вместо аргумента q .

8. В диссертации имеются мелкие недочеты, связанные точностью выражаемых мыслей, например, некоторые утверждения верны с точностью до коэффициента [после формулы (1.22)], смешанные обозначения [для биномиальных коэффициентов в формуле (1.53) и (2.32)], использование заглавных букв T и R для амплитудных коэффициентов пропускания и отражения светоделителя на стр. 33, ошибка в обозначении U' вместо M' на стр. 36, отсутствие номера раздела в ссылке перед формулой (1.65), чередующиеся обозначения K и k перед формулой (2.4), согласование падежей.

Указанные замечания и недостатки обозначают область применимости полученных соискателем результатов и недочеты при проведении анализа и изложении на письме, но не влияют на основные положения, выносимые на защиту. Достоверность полученных результатов и научных положений, выносимых на защиту, обеспечивается применением стандартных методов математического анализа, математической статистики, тщательно спланированными и реализованными экспериментами мирового уровня, сравнением предсказания теории с экспериментом. Результаты диссертации опубликованы в высокорейтинговых международных научных журналах (Physical Review A, Optics Letters, Optica, Laser Physics Letters), а также представлены на российских и международных конференциях и научных мероприятиях. В целом, представленная к защите диссертация выполнена на высоком научном уровне и характеризуется необходимой новизной и достоверностью полученных результатов. Продемонстрированные в работе методы приготовления негауссовских квазитепловых квантовых состояний с отщеплением фотонов и использовании квазитепловых состояний для характеристики линейно-оптических интегральных схем имеют большое значение для развития оптических квантово-информационных технологий.

Таким образом, диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.21 – «лазерная физика» (по физико-математическим наукам) и критериям, определенным пп. 2.1 – 2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание. Таким образом, соискатель Авосопянц Грант Владимирович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «лазерная физика».

Официальный оппонент,

Филиппов Сергей Николаевич, кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика, доцент, старший научный сотрудник – заведующий лабораторией квантовой теории информации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Тел.: +7 495 408 75 90

E-mail: sergey.filippov@phystech.edu

С. Н. Филиппов

«02» декабря 2021 г.

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9, Московский физико-технический институт.

Тел.: +7 495 408 75 90

E-mail: sergey.filippov@phystech.edu

Подпись к.ф.-м.н., доцента С. Н. Филиппова заверяю.

